

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560084
 研究課題名（和文） スマートRTM成形のための樹脂流動および硬化の超音波モニタリング
 研究課題名（英文） Ultrasonic Monitoring of Resin Flow and Cure
 for Smart Resin Transfer Molding
 研究代表者
 山崎 友裕（YAMASAKI TOMOHIRO）
 大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：80230382

研究成果の概要：複雑な形状の繊維強化プラスチック（FRP）の成形に適しているRTM法において、高品質な成形品を短い成形サイクルで得るために必要不可欠なスマート化技術の確立を目的とし、樹脂の流動および硬化の実時間モニタリングを試みた。金型内側表面での超音波の反射係数が樹脂の付着および硬化により変化することを利用すると、電磁超音波センサおよび圧電フィルムにより樹脂流動先端位置の検出と硬化モニタリングが可能であることが明らかになった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,000,000	0	1,000,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	690,000	3,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：FRP、RTM成形、モニタリング、超音波、樹脂流動、スマート化、樹脂硬化

1. 研究開始当初の背景

強化繊維を設置した金型内に樹脂を含浸させることにより繊維強化プラスチック（FRP）を成形するRTM（Resin Transfer Molding）法は、複雑な形状の製品の成形に適している。樹脂注入口位置などの成形条件の最適化や成形サイクルの短縮をめざし、樹脂の流動や硬化を成形中に実時間モニタリングするスマート化の概念が提唱されている。

樹脂モニタリングの手法として、これまで誘電率センサを用いる方法や上型から下型

への超音波の透過を用いる方法が提案されている。誘電率センサは感度の点から金型内部に設置しなければならず、成形品の表面性状や強度に影響を及ぼす可能性がある。さらに炭素繊維を強化繊維とするCFRPの場合には繊維の導電性が問題となる。超音波の透過については、成形部を通過する際に強化繊維による超音波散乱の影響を受けるため、成形品が厚い場合には信号の減衰が大きくなる。また、透過波を効率よく受信できるよう送信センサと受信センサの位置を合わせ

る必要があり、成形中の測定位置の走査が困難である。

2. 研究の目的

本研究ではR T M法のスマート化に必要な樹脂の流動および硬化を実時間でモニタリングする手法の確立を目的とし、電磁超音波センサおよび圧電フィルムにより樹脂流動先端位置の検出と硬化モニタリングを試みる。金型内側表面での超音波の反射係数が樹脂の付着および硬化により変化することを利用するため、金型内部の多重エコーの振幅変化を測定する。この手法では金型外側表面に送受信兼用のセンサを設置すればよい。成形品に影響を及ぼさないだけでなく電磁超音波センサを用いる場合には測定位置の走査が容易である。

3. 研究の方法

金型は樹脂流動を目視で確認するためのアクリル製の上型と板厚 8mm の軟鋼製下型の組み合わせとした。金型の材質は音響インピーダンスの小さいアルミニウムとしたほうが樹脂の付着による反射係数の低下が大きい、より条件の厳しい軟鋼とすることで手法の有効性を検証するとともに電磁超音波センサの設置を容易にした。成形部の寸法は、注型用金型が $170 \times 170 \times 6 \text{mm}^3$ 、R T M用金型が $200 \times 250 \times 2 \text{mm}^3$ と $300 \times 350 \times 2 \text{mm}^3$ の2種類である。注型用の金型は3辺をシールした後に上部から樹脂を流し込んだ。R T M用金型では周囲をシールした後、小型では1個、大型では2個の樹脂注入口から真空引きにより樹脂を注入した。強化繊維としてカーボナクロス（東レ、トレカクロス CO6347B）を用い、母材としてエポキシ樹脂（日新レジン、クラフトレジン）を用いた。

電磁超音波センサの構造を図1に示す。コイルに流す高周波電流により金型表面に渦電流を励起し、磁石による静磁場との相互作用で生じるローレンツ力によってせん断波を発生させる。従来の1点用センサに加えて新たに開発した多点用センサを用いた。この多点用センサは長いコイルを対象物に設置して任意の測定位置に磁石を走査するもので、すべての磁石設置位置での信号を重ね合わせたものを検出する。

E M A T の駆動および受信信号の処理には Ritec 社製の RAM-10000 を用いた。まず送信バースト波の搬送波周波数を変化させながら受信信号振幅を測定することにより共振周波数を求めておき、成形時には共振周波数を搬送波周波数とするバースト波を送信して金型板厚方向の定在波を発生させる。流動モニタリングにおいてはバースト波送信後一定時間後の振幅を連続測定し、硬化モニタリングでは定在波の減衰曲線を測定した。

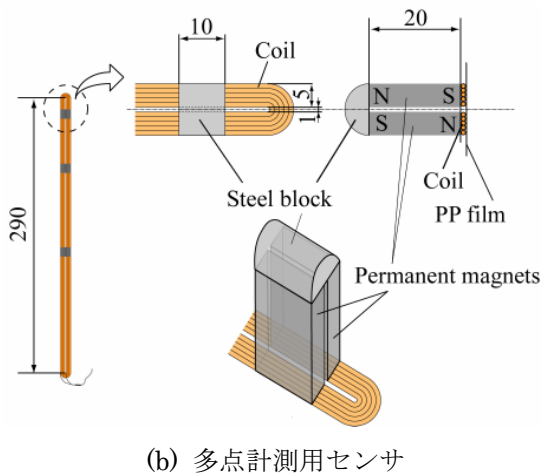
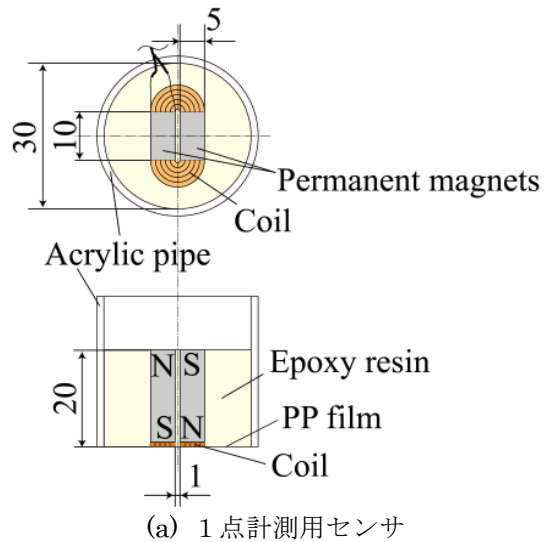


図1 電磁超音波センサの構造

10mm 幅の圧電フィルムを金型の外側表面に貼り付け、シングア라운드装置（超音波工業、UVM-2--7B）を用いて広帯域パルスで駆動した。金型内側表面での第1反射波と第2反射波をデジタルオシロスコープ（レクロイ、LT344L）に取り込み、振幅比を求めた。

硬化モニタリングについては比較のため誘電率センサによる測定も行った。感光基板で作成した有効部が $20 \times 20 \text{mm}^2$ のくし形センサをアクリル型の内側表面に貼り付け、L C Rメータ（國洋電機、KC-605）によりインピーダンスおよびキャパシタンスを測定した。

4. 研究成果

小型のR T M用金型にカーボナクロスを6枚積層し、真空引きにより樹脂を注入しながら一点用電磁超音波センサで振幅測定を行った結果を図2に示す。図に示した水色の帯はセンサ位置を樹脂流動先端が通過した時間帯を示している。樹脂の流動に合わせてセンサ位置を移動させることにより5点で

測定を行った。定在波振幅は樹脂先端が通過する時間帯で低下しており、それぞれの測定点における樹脂通過を検出できていることがわかる。ただし、振幅低下の時間帯は樹脂通過の時間帯よりやや長く、センサの検出範囲がセンサ寸法より大きいことを示している。

カーボクロスを5枚積層したRTM用金型において多点用電磁超音波センサを用いて樹脂流動検出を行った結果を図3に示す。振幅低下は測定点数と同じく2回現れているが、樹脂の通過より先に起こっている。この原因として図2の測定より積層数が少

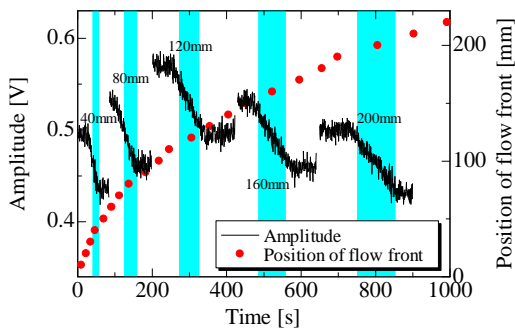


図2 1点用センサによる流動モニタリング

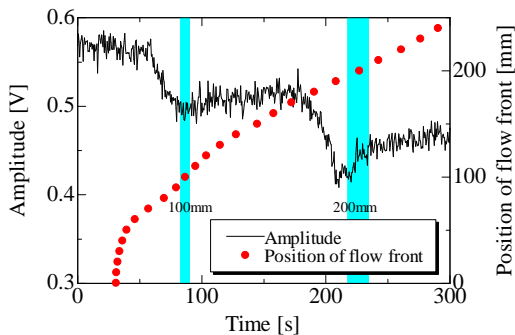


図3 多点用センサによる流動モニタリング

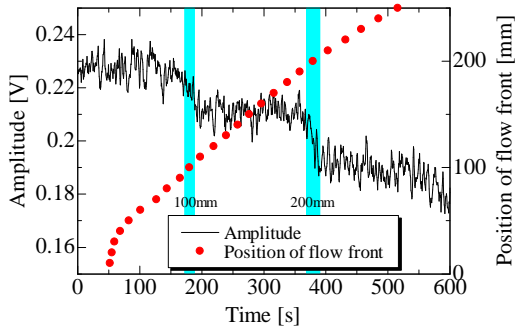


図4 多点用センサによる流動モニタリング (樹脂だけの場合)

ないためカーボクロスが金型内で移動し、上型側と下型側とで樹脂流動先端位置が異なっていることが考えられる。比較のためカーボクロスを積層せずにRTM用金型に樹脂だけを注入したときの結果を図4に示す。振幅が樹脂通過時に低下していることから、図3の振幅低下から下型側の樹脂通過を検出できるといえる。

樹脂先端の通過時間より振幅低下時間のほうが長い原因を調べるため、注型用金型に樹脂を流し込んで硬化させ、液面近傍で電磁超音波センサを走査して得られた振幅を図5に示す。10mmのセンサ寸法に対して約20mmの範囲で振幅変化が見られる。図5の結果を逆正接関数により近似したものを校正曲線とし、樹脂到達前後の振幅値を用いてRTM成形後に樹脂流動先端位置の評価を行った結果を図6に示す。ノイズの影響が現れているもののグラフが上に凸であるか下に凸であるかを再現できている。この手法は樹脂が完全に含浸したときの振幅の値を必要とするためリアルタイムでの評価は行えないが、流動先端位置の分解能を向上させることができる。

注型用金型に貼り付けた圧電フィルムを用い、金型内に段階的に樹脂の主剤だけを注

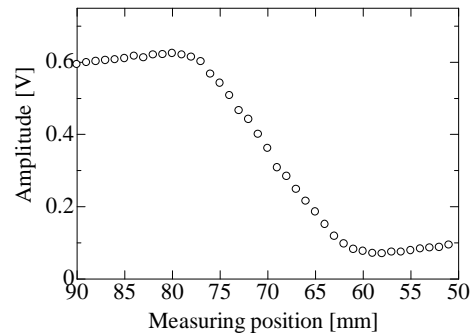


図5 センサ位置と振幅低下との関係

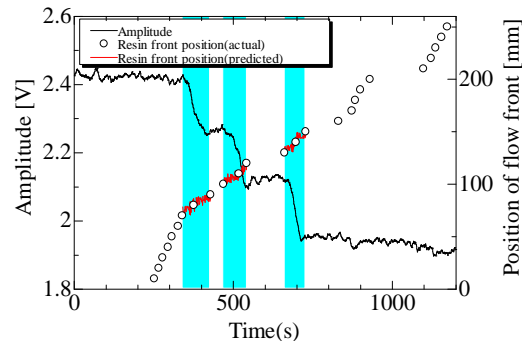


図6 多点用センサによる樹脂流動の高分解能モニタリング

入していきながら振幅比の測定を行った結果を図7に示す。振幅低下が起こっている範囲は圧電フィルムの貼付位置である0~100mmとほぼ一致していることがわかる。ただし振幅低下は樹脂液面位置と線形関係にはなく上に凸の曲線になっており、振幅低下割合がセンサ面積に対する樹脂含浸面積の比とはわずかに異なっていることを示している。逆方向に樹脂を注入した場合には下に凸の曲線となったことから、圧電フィルムと金型の接着状態の影響で感度分布が一様ではないと考えられ、流動先端位置検出にお

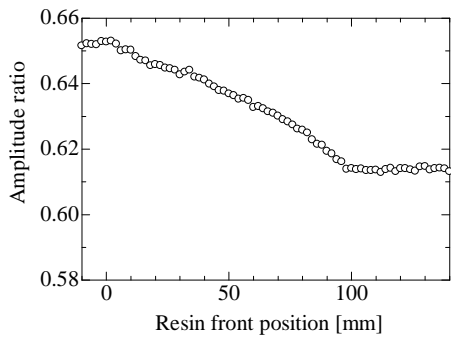


図7 圧電フィルムによる樹脂流動モニタリング

いてはあらかじめ図7の較正曲線を求めておく必要がある。ただし振幅比の低下量は樹脂の粘度に依存するため、短冊状の圧電フィルムを用いた測定は、樹脂が測定部を通過した後に樹脂流動先端位置の時間変化を精度よく求めるのに適しているといえる。成形中にリアルタイムで樹脂流動を検出するためには面積の小さい圧電フィルムを多数用いることが望ましい。

大型のRTM成型型にクロスを積層せずに樹脂を注入し、硬化モニタリングを行った結果を図8に示す。図に示すように室温はほぼ一定に保った。電磁超音波センサ、圧電センサ、誘電率センサの結果はいずれも一定値に収束する傾向を示し、硬化モニタリングが行えていることがわかる。

金型内にカーボクロスを5枚積層して同様の測定を行った結果を図9に示す。クロスを積層しない場合と比較すると、誘電率センサがカーボクロスの導電性の影響を受けているのに対し、電磁超音波センサと圧電フィルムの結果は全体の変化量は異なるものどちらも図8と同様の変化をしていることから、これらの方法はカーボクロスの有無によらず硬化モニタリングが行えることがわかった。

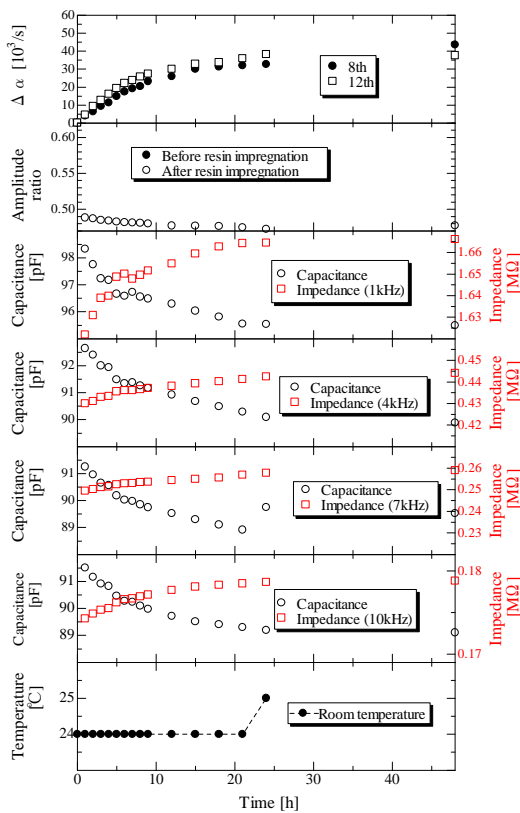


図8 樹脂硬化モニタリング (樹脂だけの場合)

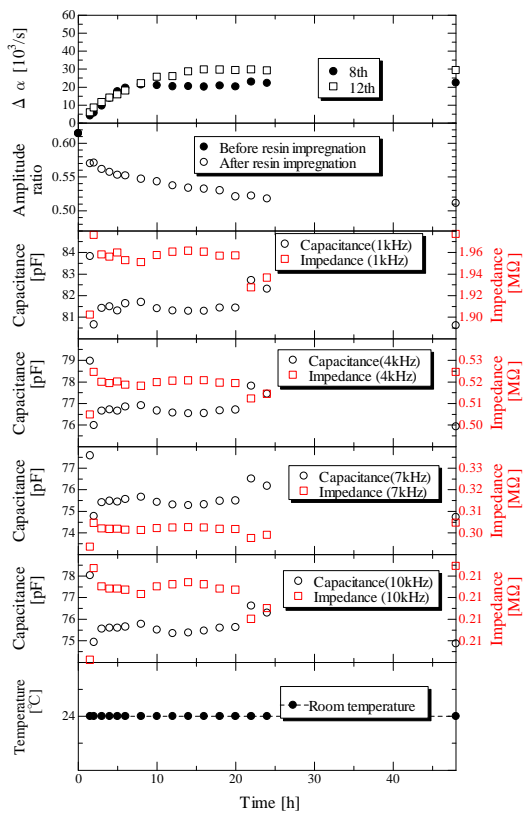


図9 樹脂硬化モニタリング

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① 山崎友裕、西野博満、R T M成形における樹脂流動先端位置の電磁超音波センサによる検出、日本機械学会論文集 (A編)、74巻、pp. 275-280、(2008)、査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 友裕 (YAMASAKI TOMOHIRO)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80230382

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし